

BEAM ACCELERATION EXPERIMENT OF X-BAND LINAC FOR INVERSE COMPTON SCATTERING QUASI-MONOCROMATIC X-RAY SOURCE AT THE UNIVERSITY OF TOKYO

Fumito Sakamoto^{1,A)}, Mitsuru Uesaka^{A)}, Tomohiko Yamamoto^{A)}, Takuya Natsui^{A)}, Yoshihiro Taniguchi^{A)}, Junji Urakawa^{B)}, Toshiyasu Higo^{B)}, Mitsuo Akemoto^{B)}, Hisaharu Sakae^{C)}, Masashi Yamamoto^{D)}

^{A)} Nuclear Professional School, the University of Tokyo

2-22 Shirakata-Shirane, Tokai, Naka, Ibaraki 319-1188, Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

^{C)} Ishikawajima-harima Heavy Industry

1 Shin-Nakahara, Isogo, Yokohama, Kanagawa 235-8501, Japan

^{D)} Akita National College of Technology

1-1 Iijima-Bunkyo, Akita, Akita 011-8511, Japan

Abstract

We are currently developing a compact X-ray source based on laser-electron Compton scattering. To realize a compact system, we adopt an X-band linear accelerator (linac) and commercial Q-switch laser. The X-ray yield by the collision between the electron beam of 30 MeV and the Q-switch Nd: YAG laser of 1.4 J/10 ns (second harmonic) is 10^7 photons/RF pulse (10^8 photons/s for 10 pps). The injector of this system consists of an X-band thermionic cathode RF gun and an alpha magnet. So far, we have constructed the whole RF system and beam line for the X-band linac and achieved 2 MeV electron beam generation from the X-band thermionic cathode RF gun. In addition, we achieved 40 MW RF feeding to the accelerating structure and beam the beam energy of 22 MeV were observed just after the accelerating structure. The laser system for the X-ray generation via Compton scattering was also constructed and evaluated its properties. In this paper, we will present the details of our system and progress of beam acceleration experiment and the performance of the laser system for the Compton scattering experiment. This work is performed under the national project of Development of Advanced Compact Accelerators in Japan and is partially supported by the Research Program on Development Innovative Technology (#0494) of the Japan Science and Technology Agency and in part supported by Health and Labour Sciences Research Grants.

東大逆コンプトン散乱準単色X線源 におけるX-band電子ライナックビーム加速試験

1. はじめに

単色X線は医療、生命科学、材料科学など広い分野で利用されている。単色X線は、既存X線応用技術の高精度/高度化だけでなく、新しい技術への期待もある。2色X線CT^[1]がその例であり、これはエネルギーの違う2種類の単色X線を用いて、物質のエフェクティブな元素番号の分布を得ようとするものであり、単色X線は必要不可欠である。単色X線源として第3世代放射光施設に代表される放射光施設が用いられているが、高額巨大な装置であり、普及性には難がある。GeV程度のエネルギーの電子貯蔵リングで生成できるX線に相当するようなエネルギーのX線を生成可能な超小型のX線源を実現するための方策として、大強度のレーザー光と電子ビー

ムを衝突させてコンプトン散乱により高エネルギーX線を得る方法がある^[2-5]。我々は、X-band (11.424 GHz) ライナックを用いたより小型のX線源の開発を進めている^[6,7]。

東京大学大学院工学系研究科原子力専攻にて進めているシステム概念図を図1に示す。これまでに、X-bandクライストロン (Toshiba E3768) の大電力試験と、3.5-cell X-band 熱陰極高周波 (RF) 電子銃の高電界試験及びビーム生成試験を行ってきており、2 MeV の電子ビーム発生を確認している^[5]。電子銃からの電子発生に引き続き、ビーム加速に用いるX-band加速管とビーム輸送用ビームラインの据付を終え、全RFシステムへの大電力投入試験を実施し、最大で40 MW (加速管30 MW, 電子銃4 MW @ 150 ns) の大電力投入を達成した。熱陰極RF電子銃からの電

¹ E-mail: saka@nuclear.jp

子ビームを加速管へ入射し、最大22 MeVの電子ビーム加速を達成した。同時に、コンプトン散乱実験に用いるNd: YAGレーザーの光学系の構築も完了し、電子ビーム衝突点において十分な安定度を有している事を確認した。現在はコンプトン散乱によるX線発生試験を実施している。

本発表では、X-bandライナックによるビーム加速試験の詳細と、コンプトン散乱によるX線発生試験について報告する。

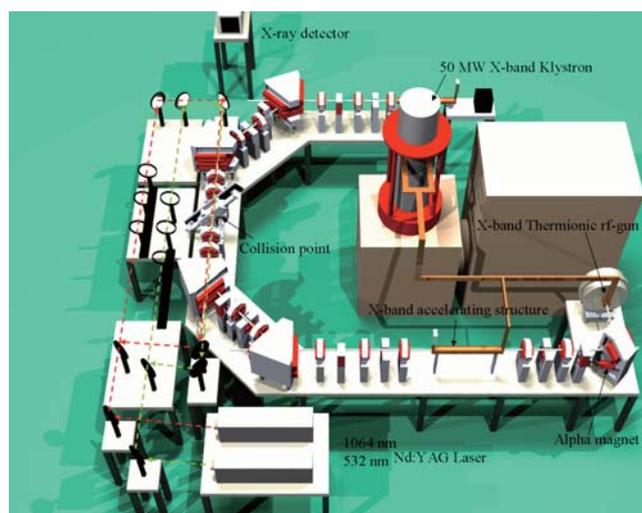


図1 東大逆コンプトン散乱X線源概念図

2. X-bandライナック高電界試験とビーム加速試験

図2にX-band熱陰極RF電子銃とX-band進行波型加速管を含む全RF立体回路システムを示す。クライストロン出力を7 dB方向性結合器により4:1の割合で分割し、クライストロン出力50 MW時40 MWを加速管へ、6 MWをRF電子銃へフィードする設計となっている。加速管は空洞内での電場分布を考慮するため、軸対象なダブルフィードタイプとなっている。加速管入力カプラ手前の3 dB方向性結合器によりRFを分割している。この方向性結合器における位相差は、ネットワークアナライザーにより測定・調整し、1度以内に合わせ込んでいる。全RFシステムのRFコンディショニング履歴を図3に示す。これまでに、10 Hz運転においてクライストロン出力約40 MW 120 nsを達成している。図4及び図5に各方向性結合機において検波器により観測されたRF波形を示す。図5のCh:3及びCh:4はそれぞれアルファ電磁石前後においてCTにより測定されたビーム電流を示しているが、電子銃よりピーク電流約100 mAの電子ビームが得られているのがわかる。この電子ビームを加速管入り口へと輸送し、ビーム加速を実施した結果、加速管後の偏向電磁石によるエネルギー測定により、22 MeVの電子加速を確認した。しかしながら、加速管後のスクリーンモニター（アルミナセラミックス）

によってビームプロファイルは観測されるものの、加速管以後でのビームロスが非常に大きく、電流値が極めて低いため、今後ビーム輸送の最適化を実施する必要がある。電子ビームのエミッタンス、バンチ長等の特性評価は、今後計画している。ビーム加速の成功に引き続き、電子ビームをレーザーパルスとの衝突点へ輸送し、コンプトン散乱によるX線発生試験体系の構築を行った。

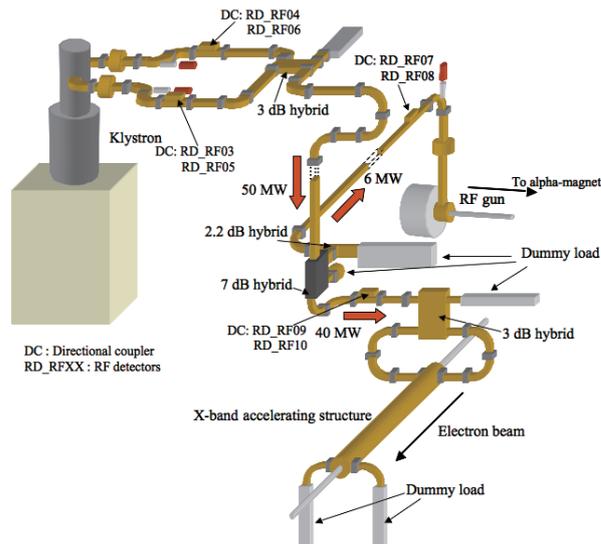


図2 X-bandライナックRF立体回路模式図

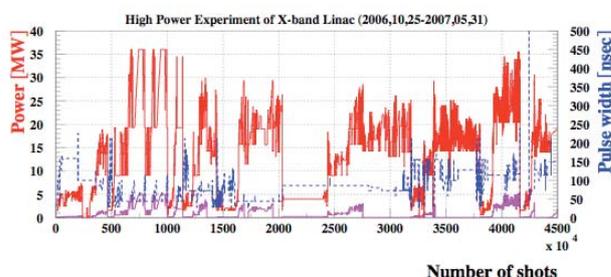


図3 X-bandライナックRFプロセッシング履歴例

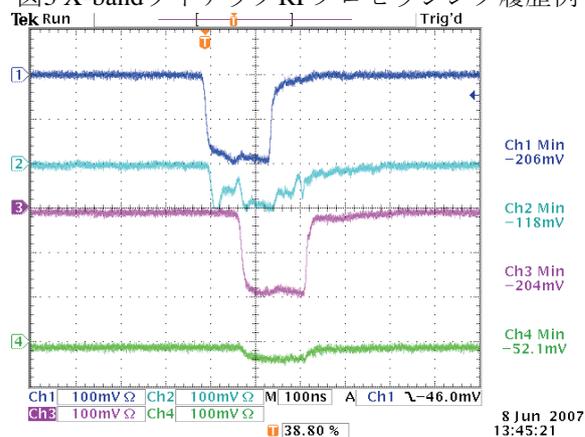


図4 典型的なRF波形(Ch.1:クライストロン出力電力、Ch.2:クライストロンへの反射電力、Ch.3:加速管への入力電力、Ch.4:加速管からの反射電力)

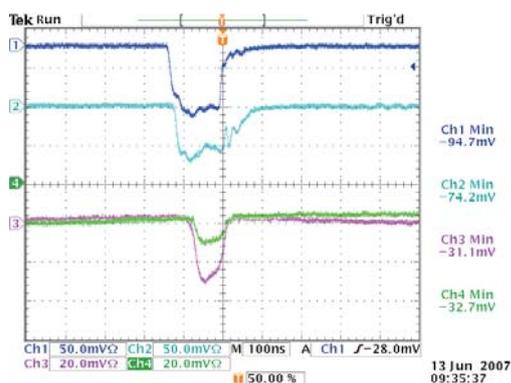


図5 典型的なRF波形(Ch.1:RF電子銃への入力電力、Ch.2:RF電子銃からの反射電力、Ch.3:アルファ電磁石前でのビーム電流、Ch.4:アルファ電磁石後でのビーム電流)

3. コンプトン散乱単色X線生成実験

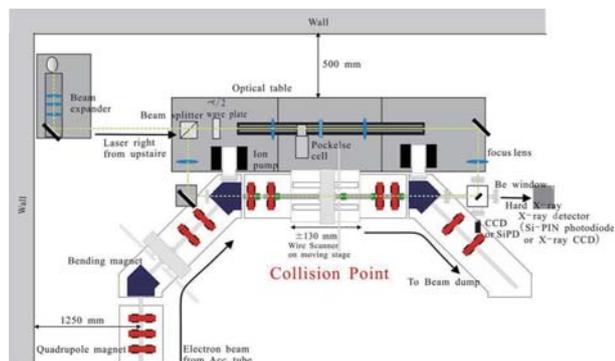


図6 コンプトン散乱X線発生実験体系

図6にコンプトン散乱X線生成のための実験体系概念図を示す。レーザー装置は地上に設置されており、ミラーによりピット内に輸送される。レーザー光は下流側偏向電磁石からビームラインに入射され、電子ビームとの衝突後、上流側偏向電磁石で大気中に取り出され、周回路に入る。コンプトン散乱により生成されたX線は、下流側偏向電磁石で電子ビームと分離され、その先の厚さ3 mmのレーザー用ミラーと厚さ100 μm のBe窓を貫いて大気中に取り出され、X線検出器に入射する。X線検出器には、NaIシンチレータ及びSi photo-diodeの使用を検討している。衝突点に設置してあるビーム診断用チェンバーは、Wire Scanner、蛍光板、ナイフエッジが一体化した構造になっており、電子ビーム・レーザー両方のプロファイルと位置を計測できるようになっている。また、このチェンバーはビーム軸方向に ± 130 mmの可動ステージに設置しているため、衝突点前後におけるビーム軌道や、正確なwaistの位置が計測可能なシステムになっている。電子・レーザー衝突試験に先立ち、レーザーシステムの性能評価試験を実施した。図8に衝突点でのレーザースポットサイズの時間変動を示すが、ビームサイズ、位置、強度共に、

10 %以下の安定度を有している事が確認されている。

現在、加速管後の電子ビームを衝突点まで輸送し、電子・レーザー衝突によるX線生成試験を繰り返し実施している。図9に衝突点における電子・レーザー双方のビームプロファイルを示す。

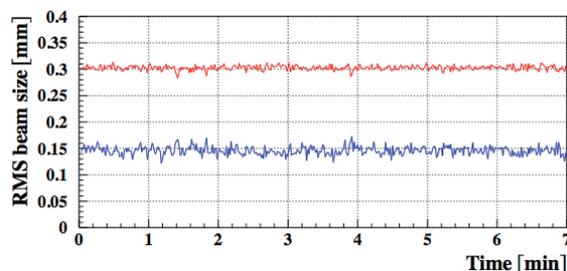


図8 電子ビーム・レーザー衝突点におけるレーザースポットサイズの安定性 (赤:horizontal、青:vertical)

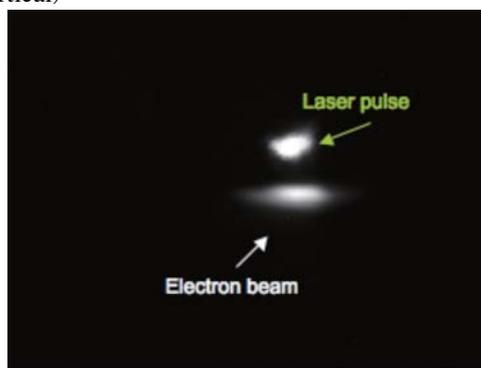


図9 電子ビーム・レーザー衝突点における電子ビーム、レーザービームプロファイル

4. まとめと今後の予定

東大原子力専攻においてX-band電子ライナックを用いたコンプトン散乱単色X線源を開発である。これまでにX-band熱陰極RF電子銃によるビーム生成を達成し、X-band加速管を含む全RF立体回路システムの構築を行った。高電界試験を実施し、クライストロンの電力投入を達成した。RF電子銃により生成したマルチバンチ電子ビームを加速管へ輸送し、22 MeVの電子加速を達成した。現在は電子・レーザー衝突点へビーム輸送を達成しており、コンプトン散乱によるX線生成試験を実施している。今後、電子ビーム特性評価及びX線特性評価を順次実施していく予定である。

参考文献

- [1] M. Torikoshi et. al., *J. Biomedical Opt.* **6**, 371 (2001)
- [2] R. Kuroda et. al., *Proc. of the European Particle Accelerator Conference*, Edinburgh, Scotland, (2006)
- [3] F. Carroll, *Am. J. Roentgenol.* **181**, 1197 (2003)
- [4] W. J. Brown, et. al., *Phys. Rev. ST.* **7**, 060702 (2004)
- [5] E. Vliet, et. al., *Proc. of the European Particle Accelerator Conference*, Lucerne, Switzerland, (2004)
- [6] F. Sakamoto, et. al., *J. Korean Phys. Soc.*, **49**, 1 (2006) 286.
- [7] K. Dobashi, et. al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44** (2005) 1999